



生物能源

Bioenergy

肖 钢 纪钦洪  编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



生物能源

Bioenergy

肖 钢 纪钦洪  编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大能源. 生物能源/肖钢,纪钦洪编著. —武汉:武汉大学出版社,2015.9
ISBN 978-7-307-16746-9

I. 大… II. ①肖… ②纪… III. ①能源—普及读物 ②生物能源—普及读物 IV. ①TK01-49 ②TK6-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 210104 号

责任编辑:孙 丽

责任校对:刘小娟

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:武汉市金港彩印有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:10.25 字数:192千字

版次:2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷

ISBN 978-7-307-16746-9 定价:860.00元(全九册)

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

“能源”，并不总是人们茶余饭后津津乐道的话题。说起“能源”，不少人会想到石油和国内三大石油公司的强大，还会联想到环境污染和全球气候变暖，但很少有人会想到“能源”本身，以及自己与“能源”的关系。然而，穷人类历史之长，尽人类足迹之远，仰人类文明之高，“能源”可谓与我们的生活息息相关，休戚与共，我们时时、处处都在利用它、依赖它。也正因为如此，“能源”反而更易被人们忽略，就像直到窒息时才想起原来我们是多么地依赖空气一样。日常生活中，我们不可避免使用能源，但很难挑选使用何种能源，无法影响或决定能源的来源、生产方式和价格，更无法通晓纷繁芜杂的能源技术及其发展方向。

时至今日，改变正在发生。随着资源、环境和气候问题的凸显，全球正在一步步迈入新一轮的能源变革，陈旧的能源开采、转化、利用方式正被逐渐淘汰，而新能源事业正悄然兴起，新资源、新技术、新理念层出不穷，一个崭新的时代即将到来，届时人与能源的关系都将发生改变。对于老百姓，不再是被动地接受能源，而是积极地创造，主动地分享，智能地消费。在中国，大多数人可能还无法想象很多丹麦人已经可以轻松通过电脑软件，随时选择并任意切换不同来源、不同价格的电力供应；更无法想象不少西班牙人每天都会关注全国各地的天气预报，来估算自己在不同地方买下部分股权的太阳能电池能发多少电，并给自己带来多少利润；而美国人已经考虑在自己的车库里安装电网连接设备，用低谷电价给自己的电动汽车充电，并在用电高峰时送电上网，赚取差价……

能源问题，是全球性问题，中国亦不可避免。从某种意义上来说，经济高速增长的中国存在着更为突出的能源问题，而中国人并非后知后觉，也不会熟视无睹。几百年的落后使国人自省，30多年的改革让国人自信，对变革的必要性我们有着清醒的认知，但使我们困惑和迷茫的是怎样付诸实践，向哪些国家学习，优先发展何种能源，以怎样的力度发展，达到怎样的效果，以及能否在改革中保持和谐稳定。

曾经听过一则寓言：一只青蛙遇到了一条蜈蚣，青蛙自忖自己有四条腿，

跳跃自如，而蜈蚣却有无数条腿，竟也行走流畅。青蛙觉得很奇怪，便问蜈蚣道：“你有这么多条腿，那你行走时都是先迈哪条腿呢？”蜈蚣听了青蛙的问话，不由地思考了起来。不料，蜈蚣一思考，竟从此不会走路了。原来蜈蚣从不曾执着于这个问题，只是目视前方，一心向前，自然而然就朝前走了。自从考虑先迈哪条腿后，它忘记了向前看，只盯着自己的脚，结果无数条腿互相磕绊，从此再也迈不开步子了。我想，蜈蚣不久就会明白：孰先孰后并不重要，重要的是认准方向，明确目标，一心向前。中国的能源改革同样如此，我们百般纠结于眼前的主次和先后之时，是否已经找到并确定了改革的正确方向和终极目标呢？

本套书介绍的是高效的能源转化技术、方兴未艾的非常规能源勘探开发技术、梯级利用的节能技术和绿色低碳的可再生能源技术，共包括《中国式低碳》《生物能源》《固体氧化物燃料电池》《二氧化碳》《分布式能源》《天然气水合物》《页岩气》《海洋能》《煤层气》9分册。编者旨在通过本套书来唤起更多人对我国能源问题的思考，提升同仁们对未来能源事业的参与度和积极性。

十方来，十方去，共成十方事；万人施，万人用，同结万人缘。我诚望书中的一些知识能对有缘的读者提供小小的启发，并在此恭候各位的批评指正。

丛书主编 



肖钢博士简介

肖钢，英国皇家化学会院士（FRSC），中国国家“千人计划”特聘专家，美国Case Western Reserve University客座教授，现为能源央企首席科学家。著有《页岩气及其勘探开发》《天然气水合物综论》《新能源经济引领新经济时代》《低碳经济与氢能开发》《大规模化学储能技术》《分布式能源综论》《还碳于地球——碳捕获与封存》《燃料电池技术》《黑色的金子——煤炭开发、利用与前景》等书。作为主要发明人，享有国际及中国授权和受理的专利180余项。



序 言

当前，人类活动同自然界之间的相互影响进一步加深。面对全球温室气体排放及其引发的气候变化，有效促进资源可持续利用、环境可持续发展，努力实现人与自然的和谐，已经成为一个世界性的重大课题。这就需要我们开辟更多的途径，找到更好的办法，而优化能源结构、提高能源转化和使用效率尤其重要。

纵观当今世界，“绿色”不再是业余消遣，不再是流行口号，而是逐渐真正成为发展、建造、设计、制造、工作及生活的方式。当把环境保护等所有的成本都纳入进来时，包括非常规油气在内的新能源变成了最时尚、最有效率、成本最低的做事方式，这是世界正在经历的最伟大的转变。绿色从只是流行变得更加可用，从一种选择变成了一种必需，从一种时尚变成了必胜的战略选择，从一个无法解决的问题变成了一个巨大的机遇。

我们有理由深信：发展清洁的新能源和高效能源技术将会变成决定未来50年国家经济地位、环境健康、能源安全及国家安全的战略选择。这场清洁技术革命关系到国家强大与否。今天，我们为了走上绿色道路所做的每一件事都会使我们国家更强大、更健康、更安全、更具创新力、更有竞争力、更能受到尊重。我们在解决自身问题的同时也在帮助全世界解决问题。

从本质上来说，科技决定未来能源。在替代能源发展过程中，到底哪一种能源应该占主导地位，各种新能源应该如何布局，应该由技术论证、环境评测和市场验证来决定。对于这点，科技界提出了林林总总的方案，有些具备了产业化的条件，有些正在开发，有些处于研究阶段，还有些则属于大胆的设计。这些人类的大课题涵盖了很多的学科领域、很广的技术专业、很深的知识层面及很大的行业范围，因此很少有人以通俗易懂的方式将这些技术情况系统地展现给读者。

恰逢此时，我很高兴看到肖钢博士及其合作者正在编写一套“新能源丛书”，该丛书系统地介绍了高效能源转化技术、非常规天然气技术及可再生能源技术等诸多方面的最新进展，这对科研人员掌握国际上新能源发展现状大有裨益，也为希望了解新能源技术概况的人士提供了有用的信息。

肖钢博士是国家引进的海外高级人才，在能源领域成果丰硕。他已经出版了数本学术专著，希望他主持编著的这套《大能源》也会受到读者喜爱。

中国工程院院士 曾恒一



曾恒一院士简介

曾恒一，海洋石油工程专家，中国工程院院士。主持设计、建造了我国第一代海上石油钻探船、海上石油平台导管架下水大型驳船、海上浮式生产储油轮等。主持国家“863”工程的“海洋边际油气田资源开发技术”项目研究并组织编制了海上油气田总体开发方案。主持完成的科研成果“渤海五号、七号自升式钻井船”获国家科技进步二等奖。

能源已渗透到了现代文明的每个角落，与我们的生活息息相关。现代社会的正常运转又依赖于能源的稳定供给，人口和经济增长也驱动能源需求持续上涨。预计到2040年，全球人口数量将从现在的70亿增长到接近90亿，经济产出将翻番，能源需求将比2010年高出30%。工业文明发展至今，不但面临着石油、天然气以及煤炭等不可再生能源的资源危机（《BP世界能源统计年鉴2012》指出，截至2011年底，世界石油探明储量只能满足54年的全球生产需求，天然气是64年，而煤炭也只有112年），而且，以高排放碳氢化石燃料为主的能源消费结构，也引发了环境污染、气候变暖等一系列问题。为此，我们需要思考什么样的能源及能源结构可以满足未来的经济增长和更大人口基数下的能源需求，并逐步解决已经存在的能源、水和食物匮乏等各种危机和大气污染、气候变暖等环境问题。

开发利用可被消费者和社会接受的储量丰富的能源新资源是全球面临的共同挑战。在寻求能源新资源方面，各国进行了大量的尝试，普遍聚焦于可再生能源，包括太阳能、水能、风能和生物能等。其中，通过合适的技术把存储在生物质中的太阳能转化为可直接利用的生物燃料将是解决能源现有困境的一种重要的绿色能源方案，目前已达到了前所未有的热度。生物燃料资源量丰富（源自太阳）、可获取（已有成熟技术，先进转化技术也进入示范阶段，同时前沿技术正在开发）、可接受（属于清洁燃料，价格越来越有竞争力），符合全球正在寻求的能源新资源的基本要素条件。相信通过应用创新和先进技术，生物质所储藏的永不衰竭能源终将被广泛利用，并能突围能源现有困局，尤其是在增加能源供应、保障能源安全和保护生态环境等方面发挥作用，这样，有助于全球经济发展与环境保护的协调同步，实现每个人寻求更高生活标准的愿景。

本书对不同技术水平的生物燃料以及不同能源形态的生物燃料的发展做了详细介绍，旨在为广大读者系统、深入地介绍全球生物燃料产业状况和技术开发进展情况等。内容丰富、信息量大、思路新颖、条理清晰、结构严谨、通俗易懂、文献引用全面以及数据资料新是本书的主要特点，同时，本书紧跟国内外生物燃料产业发展的步伐，紧密联系不同生物燃料发展的瓶颈技术及前沿技术的开发。

本书分为5章。绪论部分重点介绍全球能源需求、化石能源隐忧、寻找能源新资源及生物燃料替代化石能源的优势。第2章是“第一代生物燃料——多元化发展”，介绍国内外第一代生物燃料的产业进展，并以燃料乙醇、生物柴油为重点，阐述固体生物燃料、液体生物燃料和气体生物燃料的发展概况，例如秸秆直燃发电、成型燃料和沼气

等。第3章介绍了以纤维素乙醇、生物质气化/热解合成汽柴油（BTL）为代表的第二代生物燃料——植物纤维燃料，对生物质资源的供给、生物转化和热化学转化两大技术路径的加工工艺、核心技术问题以及国内外中试研究进展进行了详细阐述。第4章是“第三代生物燃料——藻类能源”，全面介绍了藻类能源技术链的各个环节，包括上游工艺的藻类生物学与藻类培养，下游工艺的藻类收获、脱水、干燥、产物提取、藻类能源转化技术和副产品开发等。第5章是“质疑和展望”，对国内外质疑和批评生物燃料威胁粮食安全、生物燃料生产的能效为负和生物燃料不能减排温室气体等主要问题进行澄清，最后展望国内生物燃料的发展，提出以液体生物燃料为主导，推进第二、第三代生物燃料技术的开发与产业化。

本书内容涉及能源工程、化学工程、生物化工、工业生物技术、林产化工和农业工程等领域，可供能源企业的科研人员、工程技术人员和经营管理人员参阅，也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。对初涉生物燃料领域的本科生、研究生，本书提供了概括性介绍，同时，本书可为能源企业的科研及工程技术人员提供研究思路与方向，也为希望认识生物燃料的其他领域的人员提供一种有效途径。

由于科学技术发展日新月异，加之编者水平和编写时间有限，书中难免有疏漏和不当之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2015年6月



纪钦洪简介

纪钦洪，北京科技大学环境工程系毕业，供职于能源央企，从事科研和项目管理工 作，研究方向包括生物燃料、废水处理、煤炭清洁高效转化与应用等。作为主要发明人，享有授权和受理的专利10余项。

目 录

1 绪论——从化石能源到生物燃料	1
1.1 增长中的能源需求	4
1.2 化石能源的隐忧	6
1.3 寻找能源新资源	9
1.4 绿色生物燃料	11
参考文献和资料	14
2 第一代生物燃料——多元化发展	15
2.1 固体生物燃料	18
2.1.1 生物质直燃发电	18
2.1.2 成型燃料	24
2.2 液体生物燃料	30
2.2.1 燃料乙醇	31
2.2.2 生物柴油	51
2.3 气体生物燃料	59
2.3.1 概况	59
2.3.2 应用推广	62
参考文献和资料	67
3 第二代生物燃料——植物纤维燃料	69
3.1 植物纤维原料	71
3.2 植物纤维燃料	73
3.2.1 植物纤维原料供应	75
3.2.2 植物纤维原料加工转化	78
参考文献和资料	100
4 第三代生物燃料——藻类能源	103
4.1 藻类	106
4.2 藻类能源	109

4.2.1	藻类能源概况	109
4.2.2	藻类能源技术链	110
4.2.3	资源评价与选址	125
	参考文献和资料	129
5	质疑和展望	131
5.1	质疑与澄清	133
5.1.1	粮食安全问题	134
5.1.2	大于1还是小于1	136
5.1.3	增排还是减排	139
5.2	思考与展望	142
5.2.1	替代石油的选择	142
5.2.2	生物燃料的发展	144
5.2.3	对国内发展生物燃料的思考	146
5.3	结束语	150
	参考文献和资料	151

1 绪论——从化石能源到生物燃料

“能源不够了，怎么办？”还有绿色生物燃料。

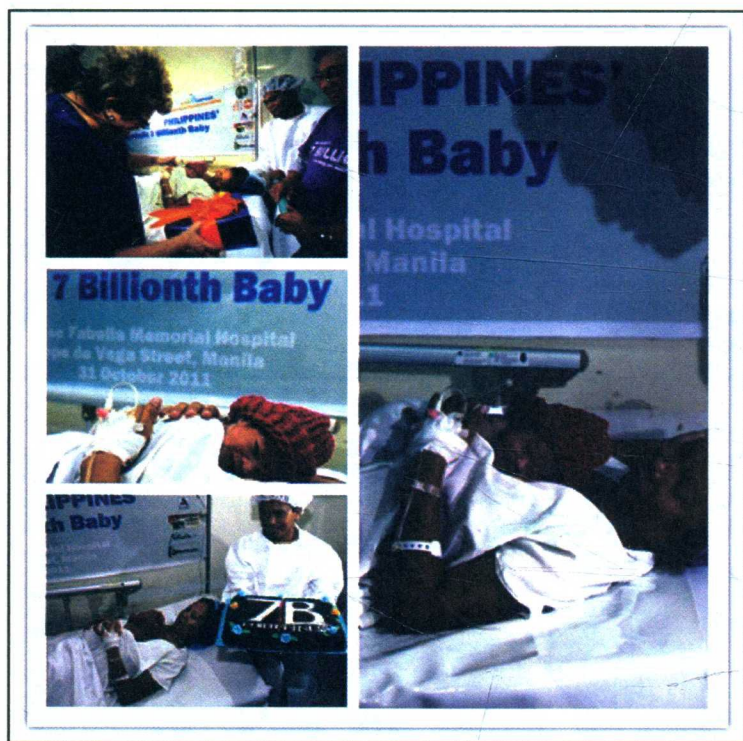
从古人“钻木取火”起，生物质就是人类的主要燃料，时间跨度长达数十万年，其间，人类采用最简单、应用最广泛的转换方式——直接燃烧，来获取生物质中储存的能量。伴随着科技进步，人类对生物质有了新的认识。



1.1 增长中的能源需求

人口和经济的增长驱动了能源需求的增长。

2011年10月31日凌晨,在媒体聚光灯的环绕下,全球第70亿人口——丹妮卡·卡马乔在菲律宾首都马尼拉诞生(图1-2)。70亿的概念是,我们每一个人所想得到的一切乘以70亿倍。在全球能源供给不稳定、粮食安全存在隐忧、环境污染严峻的今天,每一个新生命的诞生意味着需要向地球索取更多食物、更多淡水和更多能源,等等。



◀ 图 1-2 全球第 70 亿人丹妮卡·卡马乔在菲律宾诞生

70 亿人的基本需求,对人类来说已是巨大的挑战,然而世界人口还在继续增加。联合国人口基金《2011 年世界人口状况报告》指出,尽管全球生育率不断下降,但每年新增人口仍达 8000 万左右,相当于德国或埃塞俄比亚的人口数量^[2]。

能源是贯穿 70 亿人口衣、食、住、行的主线,与经济增长、生态环境保护紧密相关。维持现有经济发展水平和大力发展经济都需要充足的能源供给作保障。全球发展中国家仍有几十亿人在努力争取发展的权利和空间,同时越来越多的人正享受着现代生活带来的便利——他们购买了一生中的第一台冰箱、第一台电脑或第一辆汽车。现代化、城市化趋势带来的结果显而易见——能源需求增长,而且将持续数十年。2011 年全球能源消费总量达到 12274.6 百万吨油当量,较 2010 年增长 2.5%(表 1-1)。能源消费量的净增长再次全部来自新兴经济体,特别是亚洲地区,仅中国就贡献了全球能源消费增量的 71%^[3]。

表 1-1

全球能源消费量^[3]

年份	消费量/百万吨油当量
2001	9434.0
2002	9613.9
2003	9950.2
2004	10449.6
2005	10754.5
2006	11048.4
2007	11347.6
2008	11492.8
2009	11391.3
2010	11977.8
2011	12274.6

而埃克森美孚公司的《2040 年能源展望报告》指出,世界能源需求仍将继续增长。2040 年全球人口数量将从现在的 70 亿增长到接近 90 亿,经济产出将翻番,能源需求将比 2010 年高出 30%。经济合作与发展组织(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)国家的能源需求将保持相对稳定,但是中国和其他非经济合作与发展组织(Non OECD)国家将引领全球能源需求增长。2010—2040 年,非经济合作与发展组织国家的能源需求预计将增长近 60%^[1]。

此外,伴随人口的快速增长和生活水平的提高,食物消费将更多,这就需要更多的淡水来生产食物。满足全球对于水和食物的需求,是全球能源需求增长的又一因素。水的

加工、运输、淡化和回收利用都需要消耗大量的能源。现代农业技术是能源和淡水密集型技术,需要使用大量的化肥,而化肥又来自化石燃料。另外,生产化石能源同样需要水——钻井、洗井和加工原油时都需要用水。因此,能源、水和食物生产之间有着密切的联系。未来全球实现可持续发展时,必须以更全面的眼光看待这种关系,因为将有更多的国家面临水资源供给的巨大压力。如何生产能源,或者选择种植和吃什么食物,都应考虑是否有充足的水资源,以及水资源的获取成本有多高。同时,还需要节约用水——这将有助于高效管理能源需求,降低能源消耗及二氧化碳排放量。

1.2 化石能源的隐忧

工业文明发展至今,不仅面临能源需求持续增长带来的能源资源危机,而且还面临着以高排放碳氢化石燃料为主的能源消费结构所引发的环境污染、气候变暖等问题。《BP 世界能源统计年鉴 2012》指出,2011 年化石燃料在全球能源消费中的份额高达 87%。截至 2011 年底,世界石油探明储量约为 1.6526 万亿桶,可满足全球 54.2 年的生产需求;全球天然气探明储量可保证全球 63.6 年的生产需求;世界煤炭探明储量能满足全球 112 年的生产需求,是目前为止化石燃料储产比最高的燃料^[3](图 1-3)。从 BP 公司发布的数据看,尽管世界油气资源供应并不存在结构性短缺,但是实际上能源供给存在很多不确定的因素。由全球政治经济不稳定所引起的各种危机很可能导致能源供应紧张甚至中断,同时化石能源漫长的开发时间及某些地区以各种形式存在的勘探开发限制仍在形成挑战和阻碍,因此难以用合理价格去供应能源,满足不断增长的能源需求。

化石能源的大量消耗,令全球的二氧化碳及其他温室气体排放总量逐年增加,并远超地球的容纳能力,致使大气中温室气体的浓度持续攀升,温室效应日益明显。自工业化时代以来,人类活动已引起全球温室气体排放量增加,其中 1970—2004 年期间增加了 70%(图 1-4)。2005 年大气中的 CO_2 和 CH_4 的浓度远远超过了过去 65 万年的自然变化的范围。气候系统变暖是毋庸置疑的,从全球平均气温和海温升高、大范围积雪和冰融化以及全球平均海平面上升的观测中可以看出这一变化是明显的(图 1-5)。